

Analysis of the Principle of the Coordination between FCB Logic and Unit Relay Protection in Gas Turbine Unit

Xiaofeng Chen

Shenzhen Datang Baochang Gas Power Generation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518110, China

Abstract

FCB (Fast Cut Back) is a method for black start. Units with FCB capability can serve as unconventional black start power sources for the grid, helping restore normal operation in the shortest possible time, which yields significant social and economic benefits. In recent years, this technology has been extensively researched and applied. For gas-fired generating units connected to the grid via generator outlet circuit breakers, the FCB logic design follows these principles: the turbine and boiler must remain offline during shutdown, the gas turbine must switch to household load mode, the main transformer-side circuit breaker should be disconnected first, and the generator outlet circuit breaker must not be tripped. Therefore, it is essential to investigate how the relay protection actions of generating units coordinate with FCB logic during actual operation under full or partial grid outages, ensuring the units can smoothly achieve FCB operation with their own plant power supply.

Keywords

black start; FCB logic; frequency protection; generator set protection; plant power switching

燃气机组 FCB 逻辑与机组继电保护的配合原则分析

陈晓峰

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司, 中国 · 广东 深圳 518110

摘要

FCB是黑启动实现的方式之一,具有快速甩负荷(Fast Cut Back, FCB)能力的机组可以作为系统非常规黑启动电源,有助于电网在尽可能短的时间内恢复正常,具有巨大的社会和经济效益,近年来得到了广泛的研究和应用。采用发电机出口断路器并网的燃气发电机组在策划FCB逻辑时遵循的原则是在汽机锅炉停运的同时不联跳燃机,同时要确保燃机转换为houseload模式,优先断开主变侧断路器,发电机出口断路器不能分断。因此需要探讨在电网全部或局部失电实际运行时的发电机组继电保护动作过程与FCB逻辑的配合,从而保证机组顺利实现自带厂用电的FCB运行方式。

关键词

黑启动; FCB逻辑; 频率保护; 发电机组保护; 厂用电切换

1 引言

随着美国和西班牙电网出现的大面积停电及南方区域恶劣气候的影响,电网对辖区所属电厂的黑启动功能越来越重视,大大提高了两个细则中黑启动的专项补贴,《南方区域电力并网运行管理实施细则》《南方区域电力辅助服务管理细则》里明确定义FCB功能是指并网机组在高于某一负荷定值运行时,因内部或外部电网故障与电网解列,瞬间甩掉全部对外供电负荷,但未发生锅炉主燃料跳闸(MFT)的情况下,用以维持发电机解列带厂用电或停机不停炉的自动控制功能,并规定具有FCB功能的机组每月按15万元/台给与补助,同时明确如果在需要实施黑启动时FCB功能失

败则处以一次480万的处罚,因为黑启动发生的几率比较少,为了争取黑启动的补贴,具备FCB能力的机组基本上都申请实施了FCB功能的测试,但是其中的风险也是存在的,特别是由于没有统一的规范和标准,各电厂实施的FCB逻辑难免有考虑不周的地方,笔者就南方某电厂在实际运行发生的几起FCB功能保持失败的案例进行了总结和完善的FCB逻辑与机组保护定值的配合原则进行探讨,供广大同行参考。

2 燃机 FCB 的典型逻辑设计及原因

制造厂一般对燃机在低负荷下的燃烧模式能快速的进行调整,但是在联合循环机组中余热锅炉及汽机相关调节回路未针对FCB工况进行单独设计,无法保障FCB触发时汽机及余热锅炉有效配合,避免燃机跳机。

因此逻辑设计主要完善两个主要功能:FCB触发逻辑;

【作者简介】陈晓峰(1977-),男,中国海南琼山人,本科,工程师,从事电力系统自动化研究。

FCB 动作后锅炉侧（如旁路、汽包水位、轴封等）重要回路的超驰控制逻辑及汽机侧的响应逻辑。

2.1 FCB 触发逻辑

满足燃机触发燃机 FCB 功能（HOUSE LOAD）信号并维持维持 120 秒：

主变高压侧开关 52L 在分位，发电机出口开关在合位，触发 FCB 动作信号跳开；

在发电机出口开关处于合闸状态下，燃机功率从 135MW（5 秒倒延时）以上降到 27MW 以下延时 0.25 秒；

2.2 FCB 动作联锁

主变高压侧开关跳闸触发的 FCB 动作，联锁跳闸汽轮发电机组。

FCB 动作，超驰开汽机高、中、低压旁路，高、低压旁路 3 秒。旁路超驰开结束后，进入压力、温度自动调节方式。高、中、低旁压力设定值分别为高、中、低蒸汽流量测量值函数对应值。

FCB 动作后，高、中、低压汽包水位切至单冲量调节模式，水位设定值维持原设定值不变

FCB 动作，联锁关闭锅炉过热汽温、再热汽温调节门、电动门。

FCB 动作，辅汽至轴封压力调节门 5 秒超驰开至 50%，然后自动调节，轴封压力设定值 20kPa。

FCB 动作，运行凝结水泵输出至 100%。

汽包水位、辅汽压力、汽机轴封压力、凝结器水位等主要调节系统自动投入自动。屏蔽汽包水位、辅汽压力、汽机轴封压力、凝结器水位等系统被调量与设定值偏差大、阀门与指令偏差大切手动功能。

从 FCB 逻辑的设定来看，一般对燃机 FCB 方式实现的充分必要条件有两条：一是保证优先跳燃机主变侧高压断路器，发电机出口断路器不能断开；二是燃机不能发生连锁跳机，与燃机跳机相关的机炉电大连锁务必在 FCB 触发后快速切除，保障燃机低负荷下的正常运行。本文仅就第一条实现的逻辑及定值做详细的分析。

3 频率保护的定值计算原则

3.1 实现 FCB 触发的主要方式

要实现保护优先跳燃机主变侧高压断路器一般采用发电机频率保护来实现，更改发电机频率保护出口矩阵，保护出口只跳变高侧开关。

其频率定值如下表所示：（原燃机发电机与汽轮发电机超频保护为：51.5Hz，延时 10s。）

序号	定值名称	定值范围	整定步长	整定值
I	母高频切机频率	50.00 ~ 55.00Hz	0.01Hz	52.9
I	母高频切机延时	0.05 ~ 25s	0.01s	0.2
	频差异常告警定值	0.00 ~ 1.00Hz	0.01Hz	0.05
I	母低频切机频率	50.00 ~ 55.00Hz	0.01Hz	47.5
I	母低频切机延时	0.05 ~ 25s	0.01s	0.2

3.2 保护定值的计算原则

《南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程》规定：300MW 及以上的汽轮机，运行中允许其频率变化的范围为 48.5 ~ 50.5Hz。

低于 48.5Hz 或高于 50.5Hz 时，累计允许运行时间和每次允许的持续运行时间国内尚无正式的统一规定，应综合考虑发电机组和电力系统的要求，并根据制造厂家提供的技术参数确定。

当频率异常保护动作于发电机解列时，其定值应与低频率自动减负荷、高频率切机装置的定值配合。

低频率保护动作于信号或程序跳闸或停机。高频率保护动作于解列灭磁或程序跳闸。

在实施 FCB 逻辑时，由于出口跳闸的主体发生了变化，要保证发电机继续运行，因此必须在系统异常工况下对频率保护与发电机其他保护进行核算，确保主变出口断路器优先跳闸。

3.3 系统异常时的工况分析

现在大电网运行，出现黑网的情况的概率很低，在恶劣天气如台风冰雪等天气可能会出现局部电网停电的可能，如广州 2018 年山竹导致部分区域的电网断电超 3 天以上，急需网内电厂具备自启动的能力，局部电网的断电只有两种可能性，分析如下：

突发电网系统崩溃（可能性非常低），发电机组出现小马拉大车的现象，将

会出现机组失步振荡的可能性，按现有保护逻辑，失步保护和过负荷反时限将有可能动作跳发电机出口断路器 52G 开关，FCB 触发失败。

因此必须保证失步保护和过负荷反时限的出口逻辑和定值必须与频率保护中的低频保护配合；

电源点孤网运行：这种可能性在异常恶劣的气候下有发生的可能性，网内

落地负荷小于发电机组的额定出力，从现象上来看是大马拉小车，具体表现是燃机发电机的负荷快速下降，转为 houseload 模式，频率和电压上升，这种异常工况下如果没有达到设定的保护动作值，则发电机出口断路器 52G 和主变出口断路器 52L 都在合位，则有可能会出现燃机逆功率保护和过电压动作跳 52G 的事件，导致 FCB 失败。在这种孤网运行的状况下，由过频保护定时限动作，按现有大型发电机组的运行极限，发电机在 48.5-50.5HZ 下可以长期运行，因此频率保护的设计低频保护发报警，过频保护出口跳闸，现有过频保护的整定 51HZ 时 180 分钟，51.5HZ 时 30 分钟的整定值设定，如果将发电机频率保护设定为跳 52L 开关按这个定值在变电站孤网运行时极有可能会时间达不到动作值的情况，整定在 51.5HZ 以上有可能动作值达不到。因此在设定频率保护动作跳 52L 开关的逻辑时定值的选择尤为关键。

因此过频保护的动作值与动作时间必须与过电压保护配合，优先动作过频保护跳主使高压侧断路器 52L，不能因过电压保护动作跳发电机出口断路器 52G 导致 FCB 运行方式的失败。

3.4 FCB 功能中机组低频保护定值设定的基本原则

在实际运行中一旦出现黑网时局部电网的负荷大于发电机组的额定出力的异常现象时，发电机组不会瞬时跳机，将会低频低压过流且失步，这时机组的对称过负荷保护将会启动，因此在核定 FCB 动作逻辑中的低频保护动作值必须与发电机组的对称过负荷反时限保护配合，要确保低频保护先出口。

$$t = \frac{K_{tc}}{I_*^2 - K_{sr}}$$

$$T_s = \frac{K_{tc}}{(I_{s.op} / \frac{I_{gn}}{n_a})^2 - K_{sr}}$$

反时限上限动作时间 T_u ：按与线路纵联保护配合整定，取 $T_u = 0.5\text{ s}$ 。

反时限上限动作电流：按保护装置的定子绕组反时限过流保护动作特性曲线上 $T_u=0.5$ （反时限上限动作时间）所对应的动作电流整定。

$$I_{u.op} = \sqrt{\frac{K_{tc}}{T_u} + K_{sr}} \times \frac{I_{gn}}{n_a}$$

在 FCB 逻辑中频率保护的動作时间整定值一定要小于过负荷反时限的上限动作时间 T_u 。因此设定过频保护动作时间 $T=0.2\text{ S}$ ，小于 T_u 设定的 0.5 S 。

3.5 FCB 功能中机组过频保护定值设定的基本原则

在局部区域孤网运行时，如果落地负荷小于发电机组的额定出力，将会出现燃机迅速甩负荷达到 $houseload$ 动作的条件而触发 FCB 启动，这时如果同一条线路上的汽机如果不会迅速打闸跳机，则会出现燃机负荷快速下降甚至出现逆功率动作的现象，因此触发 FCB 后首先要切除汽机的负荷，燃机在甩负荷的过程中会出现过频过压的现象，因此 FCB 逻辑中在设定过频保护动作时间时一定要小于发电机过压保护动作的时间。根据《南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程》发电机过电保护整定动作时间计算依据为：定子过电压保护的整定值，应根据电机制造厂提供的允许过电压能力或定子绕组的绝缘状况决定。

$$U_{op} = \frac{1.3U_{gn}}{k_{tr}}$$

动作时间整定依据：

$t=0.5\text{ s}$ ，动作于解列灭磁或停机。

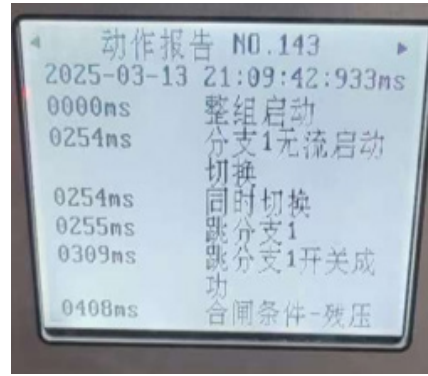
因此 FCB 逻辑设定的过频保护动作时间值为 0.2 S ，小于过电压保护的動作时间 0.5 S 。

4 厂用电快切装置的定值与 FCB 逻辑的关系

基本上所有的火电厂在规划 FCB 逻辑时都不会去考虑厂用电快切定值对 FCB 运行方式的影响，因此忽略了对厂用电快切定值的核对。南方某电厂在 2025 年 3 月曾出现一次出线线路跳闸而 FCB 维持失败的案例，主要原因就是在切换至 FCB 模式时发生了厂用电快切，致使机组自带厂用电模式失败，案例发生过程如下：

2025 年 3 月某日，机组运行过程中，出线线路发生故障，线路差动保护动作，跳 1 号燃机和 2 号汽机主变高压侧断路器，燃机 FCB 模式触发，机组在转 FCB 运行模式的过程中发生了厂用电切换的异常动作事件，致使 FCB 模式保持失败，事后查阅快切装置动作如下：

从动作现象来看，快切装置无流启动切换，检查快切定值及厂用电切换的二次设计图，快切装置没有设计电流回路，而 FCB 低频保护和无流定值如下：



描述	区组值	发电机频率保护定值		
有压定值	70.000	序号	定值名称	数值
分支1无流定值	0.040	1	低频 I 段频率定值	48Hz
分支2无流定值	0.040	2	低频 I 段累计延时	300M
并联切换压差	5.000	3	低频 II 段频率定值	47.8Hz
并联切换频差	0.15	4	低频 II 段延时	1min
并联切换相差	15	5	低频 III 段频率定值	47.5Hz
并联跳闸延时	0.500	6	低频 III 段延时	0.5S
同时切换合闸延时	0.030			
并列启动合闸延时	0.500			
失压启动定值	60.000			
失压启动时间	0.800			
无流低频定值	49.500			
无流启动时间	0.100			
失步低压定值	70.000			

从定值单上分析，由于没有接厂用电进线开关的电流，因此整个快切装置的无流保护相当于低频保护，其定值为 49.5 Hz ，远高于 FCB 动作逻辑中的 47.5 Hz 的動作值，動作时间 100 毫秒 ，因此在转成 FCB 模式的过程中，一旦出线低频到 49.5 Hz ，则厂用电快速进行切换，从而导致 FCB 模式保持失败。

因此对于未接厂用电进线开关电流回路进入快切装置的定值设定中，要将无流启动关闭。

5 结论

对于燃气轮机的 FCB 模式的逻辑设定值，要充分考慮保护定值的配合，配合原则为：1、过频保护的動作时间要小于机组的过电压保护動作时间；2、低频保护的動作时间要

小于对称过负荷的动作时间上限值；3、对于厂用电快切装置没接入电流回路的定值设定，一定要将无流启动切换的功能关闭。

参考文献

[1] 《中国南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程/

CSG1204025-2017》南方电网企业标准，2017年5月发布。

[2] 三菱燃机用户手册

[3] 《南方区域电力并网运行管理实施细则》

[4] 《南方区域电力辅助服务管理细则》

[5] 南瑞继保《PCS-9655快速切换装置说明书》